

파이버 레이저를 이용한 순 티타늄 박판의 용접특성 향상을 위한 연구 - 실드가스 노즐변수의 영향 -

김 중 도*[†] · 김 지 성**

*한국해양대 해사대학 기관공학부

**한국해양대 대학원 기관공학과

The Study for Improving the Weldability of Pure Titanium Sheet by Using Fiber Laser - The Effect of Shielding Gas Nozzle Variable -

Jong-Do Kim*[†] and Ji-Sung Kim**

*Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean Univ., Busan 49112, Korea

**Graduate School, Korea Maritime and Ocean Univ., Busan 49112, Korea

[†]Corresponding author : jdkim@kmou.ac.kr

(Received September 8, 2016 ; Revised September 21, 2016 ; Accepted September 28, 2016)

Abstract

This study was performed bead welding of pure titanium by using fiber laser. Since titanium is very sensitive to oxidation and nitriding during welding, it is important to compose the shielding equipment compared with different material. Thus side and coaxial shield nozzle, rail and chamber type shielding equipment are widely used to protect effectively the weld during welding. Experiments were performed by changing nozzle angle and distance using side and coaxial shield nozzle. The bead colors of gold, brown, blue, purple and yellowish white were obtained by changing variables of shield nozzle, and then its weldability was investigated. As experiment result, sound and not brominated beads were formed when side nozzle angle and distance were respectively 45° and 10 mm.

Key Words : Pure titanium, Laser welding, Fiber laser, Side shield nozzle, Coaxial shield nozzle, Nozzle angle, Nozzle distance, Oxidation, Nitriding

1. 서 론

최근 경량 재료의 수요는 효율성 향상 및 환경문제의 개선 등으로 인해 여러 분야에서 꾸준히 증가되어 왔다. 특히 티타늄 합금의 사용은 높은 비강도, 좋은 파괴 인성, 내식성, 피로특성 및 고온 온도 특성 때문에 수많은 분야에서 빠르게 확산되고 있으며, 특히 항공, 원자력 및 자동차분야에서 널리 적용되고 있다¹⁻³⁾.

티타늄 합금의 용접 및 접합을 위하여 여러 가지 기술이 개발되어 왔으며 그 중 레이저 용접의 적용이 최근 많은 각광을 받고 있다. 레이저 용접은 높은 에너지 밀도를 가지므로 어스펙트비(aspect ratio)가 크고 고

품질, 고정밀의 용접이 가능하며 변형이 적다⁴⁻¹²⁾.

티타늄 합금은 용접 시 산화 및 질화가 되기 쉬운 성질을 가지고 있으므로 적절한 실드장치를 사용하여 용접을 실시하여야 한다. 용접부를 보호하기 위한 실드장치로서 동축 실드 노즐, 사이드 실드 노즐, 가스 트레일러형(gas trailer type), 챔버형(chamber type) 실드장치 등이 사용되어 왔다¹³⁻¹⁵⁾. 특히, 사이드 및 동축 실드 노즐은 노즐 거리 및 각도에 따라 실드효과가 달라지게 되며 두 변수에 대한 최적화가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 티타늄 용접 시 사이드 및 동축 실드 노즐을 사용하여 실드하였으며 노즐변수에 따른 용접특성을 파악하고 최적의 용접조건을 도출하고자 하였다.

2. 실험 재료 및 방법

본 연구에서 사용된 재료는 불순물이 거의 포함되지 않은 ASTM-B265 Grade1의 순 티타늄이며 시험편의 크기는 가로 50 mm, 세로 150 mm, 두께 0.5 mm이다. 재료의 기계적인 특성을 Table 1에 나타낸다. 실험에 사용된 레이저는 최대 출력 6.3 kW, 다이오드 레이저(LD) 여기방식의 CW파이버 레이저이다. 집광광학계의 초점길이는 250 mm, 콜리메이터(collimator)는 160 mm로 초점에서의 이론적인 스폿 사이즈(spot size)는 312.5 μ m이다. 전면 및 이면 비드는 각각 유량 20 l/min와 10 l/min의 아르곤을 사용하여 실드하였으며 전면 실드가스 노즐은 직경 8 mm인 사이드 노즐 또는 직경 10 mm의 동축 노즐을 사용하고 이면 비드는 지그(jig) 홈을 통해 실드가스를 공급하였다. 각 실드 노즐 장치의 모식도를 Fig. 1에 나타낸다. 사이드 실드 노즐의 변수로는 사이드 실드 노즐 각도(α), 노즐끝단과 노즐 실드가스 분사 지점까지의 거리(d), 레이저 조사점과 실드가스 분사 지점까지의 거리(ℓ)를 중심으로 각각의 특성을 살펴보았으며, 동축 실드 노즐의 변수는 동축 노즐 끝단과 실드 가스 분사지점까지의 거리(d)를 변화하면서 용접을 실시하였다.

Table 1 Mechanical characteristics of material

Mechanical characteristics Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
Pure titanium (Gr.1)	193	300	33	116.7

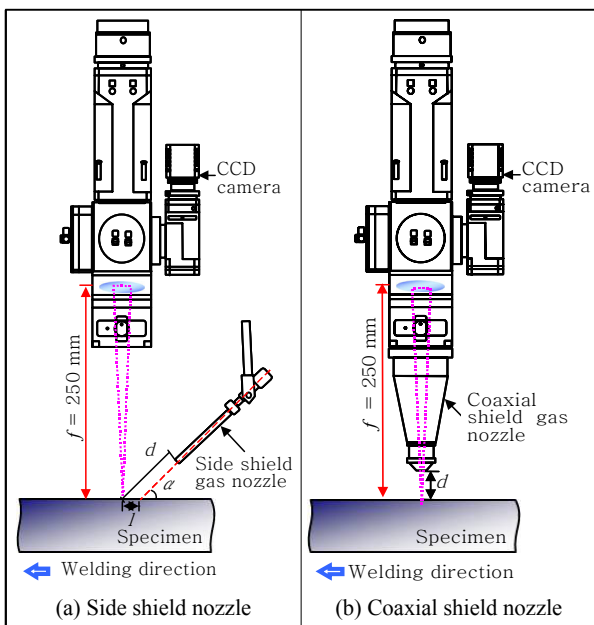


Fig. 1 Experimental setup for laser welding

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실드가스 노즐변수에 따른 용입특성

3.1.1 사이드 실드 노즐 각도 변화

사이드 실드 노즐각도(α)는 용접 시 발생하는 기홀과 재료내부 용액의 거동에 큰 영향을 미치는 요소이므로 노즐각도의 영향을 살펴보기 위하여 지그(jig)와 간섭이 발생하지 않는 범위내에서 노즐각도를 변화하여 용접을 시행하였다. 전면 실드가스는 아르곤 20 l/min, 노즐끝단과 노즐 분사점까지의 거리(d)는 10 mm, 레이저 조사점과 노즐 분사점까지의 거리(ℓ)는 10 mm로 고정하고 노즐각도를 15~60°까지 15°간격으로 변화시키면서 용입특성을 평가하였다.

각각의 노즐각도에 따른 전면 비드폭 및 용입깊이의 측정결과와 전면비드, 이면비드 및 횡단면의 사진을 Fig. 2와 Fig. 3에 나타낸다. 전면비드를 살펴보면 노즐각도 15, 30, 45, 60°에서 각각 청색+자색, 갈색+자색, 금색, 갈색의 비드색이 나타났으며, 각도 45°를 제외한 조건에서는 비드 표면의 조도가 불균일하고 험핑비드가 발생하며 비드형상이 불규칙하였다. 비드 표면의 조도가 불균일한 이유는 비드색에 따라 산화막의 두께가 달라지기 때문으로 사료된다. 전면 비드폭과 용입깊이는 노즐 각도변화에 따라 큰 차이가 없었으며, 비드색을 통하여 산화정도를 간접적으로 파악한 결과 금색의 비드색이 나타난 노즐각도 45°가 가장 양호하다고 판단된다.

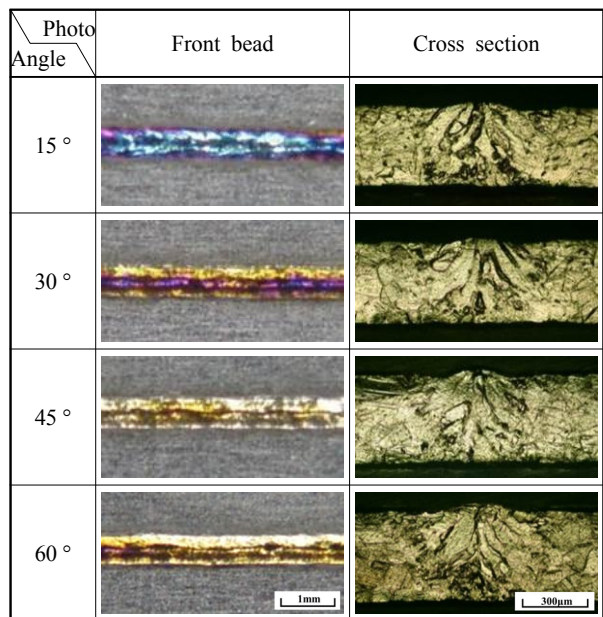


Fig. 2 Various bead shapes with angle of side shield gas nozzle in bead welding($f_a=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=10$ m/min)

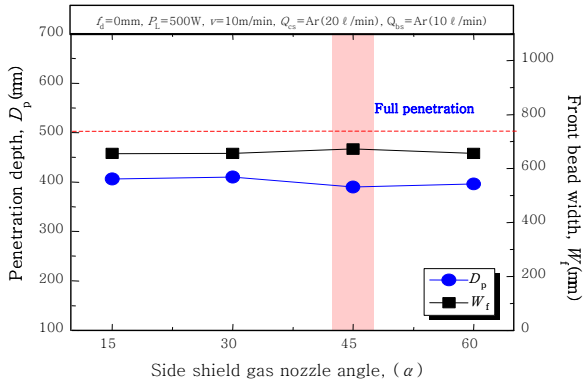


Fig. 3 Penetration properties with angle of side shield gas nozzle in bead welding

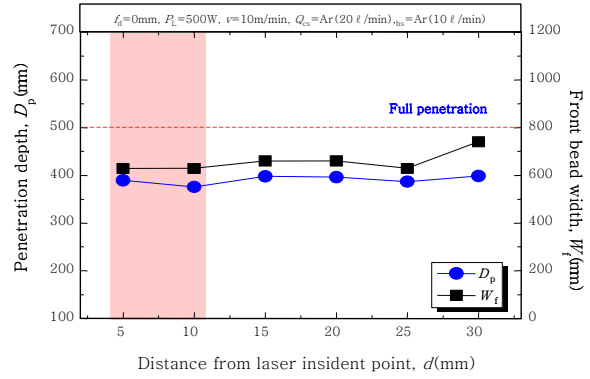


Fig. 5 Penetration properties with distance between shield gas nozzle-lip and laser incident point using side shield gas nozzle in bead welding

3.1.2 사이드 실드 노즐 거리(d, ℓ)의 변화

(1) 노즐끝단과 분사지점까지의 거리

사이드 노즐끝단과 실드가스 분사지점까지의 거리인 노즐거리(d)에 따른 용입특성을 평가하기 위하여 전면 실드가스 아르곤 20 l/min, 노즐각도 45°, 레이저 조사점과 실드가스 분사점까지의 거리(ℓ)는 10 mm로 설정하고, 노즐거리를 5~30 mm까지 5 mm간격으로 변화하였다.

Fig. 4와 Fig. 5에 각각의 노즐거리에 따른 용입특성 그래프와 전면비드, 이면비드 및 횡단면의 사진을 나타낸다. 전면비드를 살펴보면 5~10 mm일 때 은백색의 건전한 비드가 나타난 반면, 15 mm이상에서는 노즐거리가 증가함에 따라서 산화반응으로 인해 금색, 청색, 자색 및 청백색의 비드가 나타났으며, 점차적으로 험평 비드가 심해짐을 알 수 있다. 이것은 노즐거리가 증가함에 따라서 실드가스가 분산되어 밀도가 감소하므로 용접부를 대기로부터 효과적으로 차폐하지 못하여 충분

한 산화반응에 의한 영향으로 판단된다.

전면 비드폭과 용입깊이는 노즐거리가 멀어질수록 산화열로 인하여 모두 증가하는 경향을 나타내었다. 산화가 진행됨에 따라서 용입이 증가하는 이유는 용액에 산소가 용입되면 고온부에서 표면장력이 증가하므로 용액의 대류방향이 가운데로 몰리기 때문으로 생각된다. 이러한 결과로부터 사이드 노즐거리가 5~10 mm를 최적의 조건으로 선정하였다.

(2) 레이저 조사점과 분사지점까지의 거리

레이저 조사점과 실드가스 분사지점까지의 거리인 노즐거리(ℓ)에 따른 용입특성을 평가하기 위하여 노즐거리를 -5~30 mm까지 5 mm간격으로 변화하였다. 노즐거리가 (-)의 경우에는 실드가스 분사지점이 레이저 조사점보다 앞쪽에 위치한다는 것을 의미한다. 다른 실드가스 변수는 아르곤 가스는 20 l/min, 노즐각도는 45°, 노즐끝단에서 레이저 조사점까지의 거리(d)는 10 mm로 설정하였다.

각각의 노즐거리에 따른 용입특성 그래프와 전면비드, 이면비드 및 횡단면의 사진을 Fig. 6과 Fig. 7에 나타낸다. 전면비드를 살펴보면 노즐거리가 -5 mm일 때 청백색의 비드가, 0~10 mm일 때 은백색의 건전한 비드가 나타났으며, 15 mm이상에서는 노즐거리가 증가함에 따라 산화반응으로 인하여 금색, 갈색, 자색 및 흰노랑의 비드색과 조악한 비드형상이 나타났다. 티타늄은 온도가 증가할수록 산소 및 질소와의 반응성이 증가하므로 용접진행 방향 뒤편의 용접부가 냉각되기 전까지 대기로부터 보호하는 것이 중요하다. 노즐거리가 -5 mm일 경우, 레이저 빔 조사점보다 앞쪽에 실드가스가 분사되므로 고온의 용접부를 효과적으로 보호할 수 없게 된다. 노즐거리가 15 mm이상일 경우에는 용접 방향 뒤편의 용접부에 실드가스가 공급되어 레이저 빔 조사점과 근접한 용접부를 보호하는데는 한계가 있기 때문에

Distance(d) Photo	5 mm	10 mm	15 mm
Front bead			
Cross section			
Distance(d) Photo	20 mm	25 mm	30 mm
Front bead			
Cross section			

Fig. 4 Various bead shapes with distance between shield gas nozzle-lip and laser incident point using side shield gas nozzle in bead welding($f_i=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=10$ m/min)

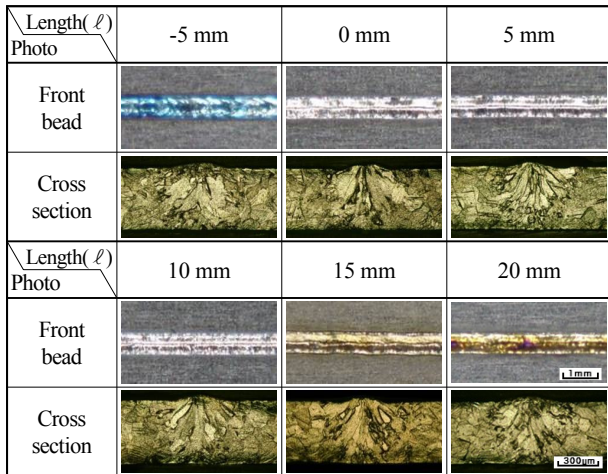


Fig. 6 Various bead shapes with length between shielding zone and laser incident point using side shield gas nozzle($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=10$ m/min)

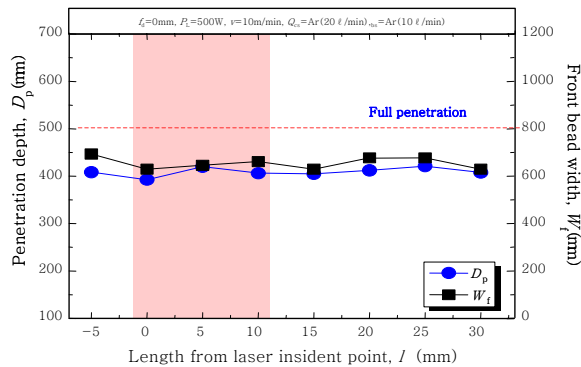


Fig. 7 Penetration properties with length between shielding zone and laser incident point using side shield gas nozzle($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=10$ m/min)

용접부의 산화반응이 발생한다고 판단된다. 전면 비드 폭과 용입깊이는 노즐거리에 따라서 다소 증가하는 경향을 나타내었다.

이상의 결과로부터 레이저 조사점과 실드가스 분사점까지의 노즐거리는 은백색의 건전한 비드가 나타나는 0~10 mm를 최적의 조건으로 선정하였다.

3.1.3 동축 실드 노즐거리(d)의 변화

동축 실드가스 노즐을 사용할 경우 레이저 빔은 실드 가스를 통과하여 재료에 조사되므로 재료증발에 의한 플라즈마뿐만 아니라 실드가스에 의한 플라즈마도 발생할 수 있다. 반면 사이드 노즐을 사용할 경우 측면에서 실드가스를 공급하기 때문에 레이저 빔 조사로 인해 발생하는 플라즈마를 옆으로 끌어내는 역할을 한다. 따라서 레이저 용접 시 동축 실드 노즐을 사용할 경우에는 발생하는 플라즈마가 많을 뿐만 아니라 플라즈마를 옆으로 끌어주는 역할도 없기 때문에 동축 실드 노즐을 사

용하는 것이 사이드 실드 노즐을 사용하는 것보다 플라즈마에 대한 영향을 더 많이 받게 된다.

동축 실드 노즐끝단과 실드가스 분사지점까지의 거리 (d)는 용접부에 미치는 실드가스의 압력과 범위를 변화시키며, 거리가 가까운 경우에는 실드가스 압력이 높으나 범위가 좁은 반면 거리가 먼 경우에는 실드가스 압력은 낮으나 범위가 넓어진다. 따라서 실드가스의 압력 및 범위를 고려하여 용접부의 온도가 550°C이하로 하강될 때까지 대기로부터 용접부를 보호하기 위해서는 적절한 거리선정이 필요하다.

동축 실드 노즐끝단과 실드가스 분사지점까지의 거리인 노즐거리에 따른 용입특성을 평가하기 위하여 동축 노즐 거리를 8~28 mm까지 4 mm간격으로 변화하였다. 8 mm 미만은 광학계 헤드와 지그와의 간섭 때문에 실험이 불가하여 최소 노즐거리를 8 mm로 설정하였다. 실드가스로는 아르곤 20 l/min를 사용하였다.

동축 실드 노즐거리 변화에 따른 용입특성 그래프와 전면비드, 이면비드 및 횡단면의 사진을 Fig. 8과 Fig.

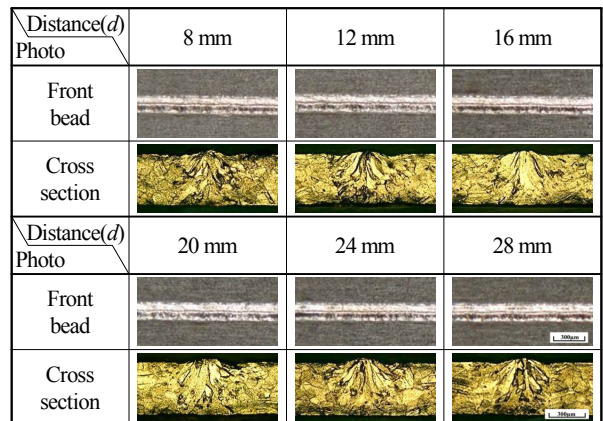


Fig. 8 Various bead shapes with distance between shield gas nozzle-lip and laser incident point using coaxial gas nozzle in bead welding($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=10$ m/min)

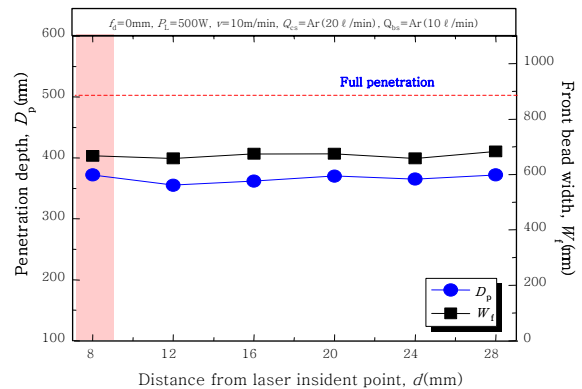


Fig. 9 Penetration properties with distance between shield gas nozzle-lip and laser incident point using coaxial gas nozzle($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=10$ m/min)

9에 나타난다. 모든 조건에서 은백색의 건전한 비드가 얻어졌으며, 노즐거리가 증가함에도 산화반응이 발생하지 않기 때문에 전면비드폭 및 용입깊이는 큰 변화가 나타나지 않았다. 횡단면을 관찰한 결과 용접부 형상 또한 모든 조건에서 비슷하였다. 하지만 비드용접보다 더 높은 입열량이 요구되는 겹치기 용접에서는 용접부의 냉각속도가 상대적으로 감소하기 때문에 동축 실드 노즐거리가 짧을수록 실드에 유리하다고 판단되므로 동축 노즐거리 8 mm를 최적의 조건으로 선정하였다.

3.2 비드색에 따른 용접부의 특성

3.2.1 용접부의 미세조직

티타늄은 용접 중 발생하는 산화정도에 따라 비드색이 달라지며 이것은 비드표면에 수 nm~수십 nm의 산화층이 발생하여 빛의 산란을 일으키기 때문이다. 따라서 본 절에서는 광학 현미경을 사용하여 비드색에 따른 용접부의 미세조직적 특징을 파악하였다.

분석에 사용된 비드색은 총 5가지이며 동일한 입열량 조건에서 실드가스 노즐변수 조건을 다르게 하여 얻을 수 있었다. Fig. 10에 비드색에 따른 용접부의 광학현미경 확대 사진을 나타낸다. 금색은 노즐각도 45°, 갈색은 노즐각도 60°, 청색은 노즐거리(ℓ) 5 mm, 자색은 노즐거리(ℓ) 25 mm, 그리고 흰노랑은 노즐거리(ℓ) 30 mm에서 각각 얻을 수 있었다.

비드색이 금색, 갈색, 청색 및 자색일 경우에는 조대한 주상정이 나타나며 미세조직적인 큰 차이가 나타나지 않았으나, 산화정도가 심해짐에 따라서 조대한 주상정의 크기가 다소 작아지는 경향을 나타내었다. 비드색이 흰노랑일 경우, 금색~자색과 같이 주상정 조직이 관찰되지 않았으며 용융부 조직의 색깔이 어렵게 관찰되었다.

3.2.2 비드색에 따른 경도특성

Fig. 11에 각 비드색에 대한 경도측정 결과를 나타낸다. 경도시험 조건은 하중 100 g, 유지시간은 10초로 하였으며 경도시험은 비드표면 200 μm아래에서 100 μm 간격으로 측정되었다.

측정 결과, 모재의 경도값은 비커스 경도 110~120 Hv이며, 용융부의 경도값이 모재의 경도값보다 상승하였다. 각 비드색의 용융부 경도값을 비교한 결과, 비드색이 금색, 갈색, 청색인 경우 비커스 경도 140~150 Hv으로 모재대비 1.3배 증가하였으며 비드색이 자색 및 흰노랑인 경우 250~260 Hv로 모재대비 2배이상으로 경도값이 크게 증가하였다. 따라서 금색, 갈색, 청색, 자색, 흰노랑 순으로 경도값이 증가하는 경향을 나타내었다.

비드색이 금색~청색까지는 용융부의 경도값이 모재와 유사하므로 취화되지 않은 양호한 용접부로 판단할 수 있다. 반면에 비드색이 자색 및 흰노랑인 경우 용접

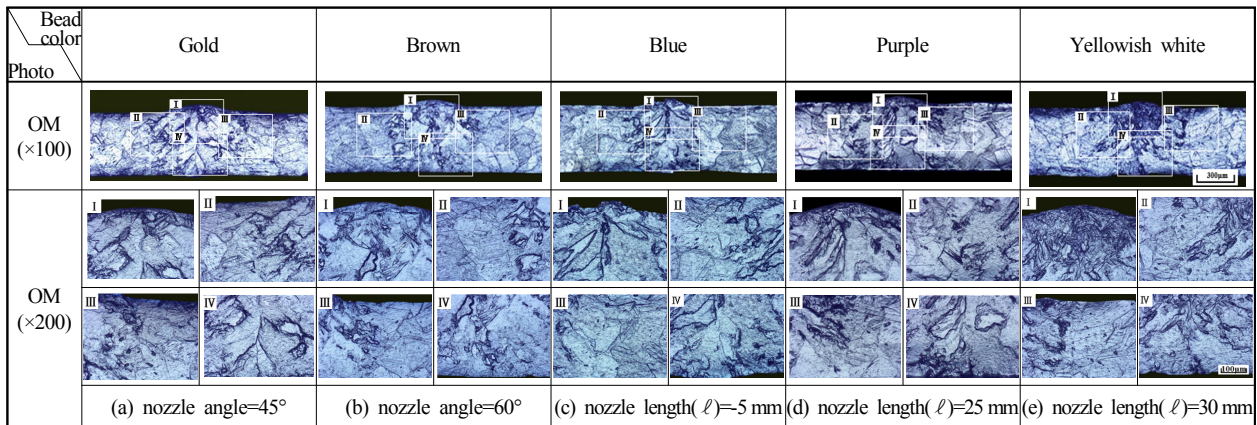


Fig. 10 Cross section observed by OM with bead color($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=10$ m/min)

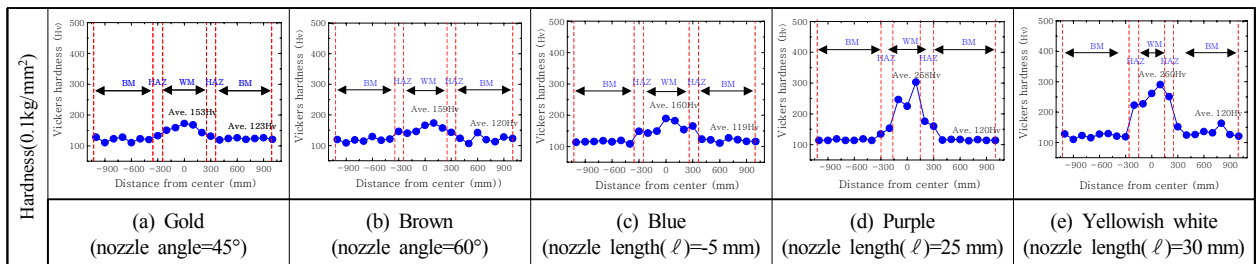


Fig. 11 Hardness distribution of the cross section with bead color($f_d=0$ mm, $P_L=500$ W, $v=10$ m/min)

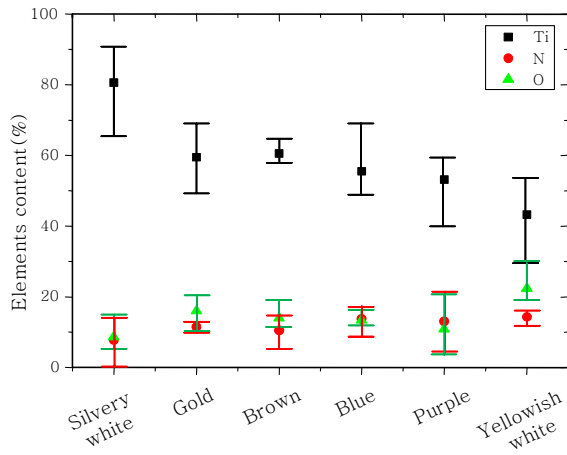


Fig. 12 Results of EDS spot analysis on cross section with bead color

부가 취화되어 경도값이 크게 상승하였으므로 불량한 용접부로 취급할 수 있다.

3.2.3 용접부의 성분분석

티타늄 용접 시 산화정도에 따라 비드색과 조직적인 특성이 달라지므로 이에 대한 세부적인 분석을 위하여 성분 분석을 실시하였다. Fig. 12에 각 비드색에 따른 용접부 상부의 EDS 점 분석 결과를 나타낸다. 점 분석은 용접부 상부의 10개점을 측정하여 평균값을 취하였다.

분석에 사용된 원소는 티타늄, 질소 및 산소 3종류이며, 그래프에 비드색에 따른 각 원소의 평균값과 최대/최소값을 나타내었다. 비드색이 은백색, 금색, 갈색, 청색, 자색 및 흰노랑으로 변할수록 티타늄 함량은 감소하였으며 질소 및 산소의 함량은 증가하는 경향을 나타내었다. 질소 및 산소량에 따른 비드색 순서는 경도에 따른 비드색 순서와 일치하였다. 따라서 비드색에 따른 조직적 및 기계적인 특성은 산소와 질소가 용접부에 반응하는 정도에 기인한다고 판단된다.

4. 결 론

파이버 레이저를 이용하여 두께 0.5 mm의 순 티타늄 박판을 노즐 변수를 변화하여 용접을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 사이드 실드노즐 변수를 변화하여 실험한 결과, 노즐각도=45°, 사이드 노즐끝단과 실드가스 분사지점까지의 거리(d)=10 mm, 레이저 조사점과 실드가스 분사지점까지의 거리(ℓ)=10 mm에서 은백색의 양호한 비드를 얻을 수 있었다.

2) 동축 실드노즐 거리(d)를 변화하여 실험한 결과, 모든 조건에서 은백색의 양호한 비드를 얻을 수 있었으며, 본 실험조건보다 입열량이 많을 경우에는 노즐 거

리가 가까울수록 용접부 실드에 유리하다고 판단된다.

3) 비드색에 따른 용접부의 미세조직을 관찰한 결과, 비드색이 금색, 갈색, 청색, 자색으로 갈수록 주상정 조직의 크기가 작아지는 경향을 나타내었으며 흰노랑일 경우 용접부의 조직이 어둡게 관찰되었다.

4) 비드색에 따른 경도특성을 평가한 결과, 비드색이 금색, 갈색, 청색까지는 모재와 유사한 경도값을 나타내어 취화되지 않은 양호한 용접부인 반면 자색 및 흰노랑은 경도값이 크게 상승하므로 취화된 불량한 용접부로 판단된다.

5) 비드색에 따른 용접부의 EDS 점분석을 한 결과, 비드색이 금색, 갈색, 청색, 자색 및 흰노랑으로 변할수록 티타늄 함량은 적어지고 산소 및 질소 함량은 증가하는 경향을 나타내었다.

References

1. Veiga C, Davim JP, Loureiro AJR., Properties and applications of titanium alloys:a brief review., *Adv Mater Sci*, 32 (2012), 133-48
2. Henriques VAR., Titanium production for aerospace applications., *J Aerosp Tech-nol Manag*, (2009)
3. Peters M, Kumpfert J, Ward CH, Leyens C., Titanium alloys for aerospace applications., *Adv Eng Mater*, 5, (2003), 6
4. Saresh N, Gopalakrishna Pillai M, Mathew J., Investigation into the effects of electron beam welding on thick Ti-6Al-4V titanium alloy., *J Mater Process Tech-nol*, 83, (2007), 192-193
5. Lathabai S, Jarvis BL, Barton KJ. Comparison of key-hole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium., *Mater Sci Eng*, 299, (2001), 81-93
6. Greenwell T, Ramulu M, Labossiere P., Characterization of tensile behavior in friction stir-welded titanium alloy, Ti-6Al-4V., *In: Proceedings of the SEM Annual Conference*, (2009)
7. Mironov S, Sato YS, Kokawa H., Development of grain structure during friction stir welding of pure titanium., *Acta Mater*, 57, (2009), 4519
8. Balasubramanian M, Jayabalan V, Balasubramanian V., Effect of pulsed gas tungsten arc welding on corrosion behavior of Ti - 6Al - 4V titanium alloy., *Mater Des*, 29, (2008), 1359
9. Li R, Li Z, Zhua Y, Ronga L., A comparative study of laser beam welding and laser - MIG hybrid welding of Ti - Al - Zr - Fe titanium alloy., *Mater Sci Eng*, 42, (2011), 1138
10. Giuseppe Casalino, Michelangelo Mortello, Sabina L. Campanelli, Ytterbium fiber laser welding of Ti6Al4V alloy., *Journal of Manufacturing Processes*, 20(1) (2015), 250-256

11. Min-ho Park, Ill-soo Kim, Jong-Pyo Lee, Byeong-ju Jin, Do-hyeong Kim, In-ju Kim, Ji-sun Kim, A Study on HAZ Softening Characteristics of Fiber Laser Weldment for High-Strength Steel, *J. of Welding & Joining*, 33(6), (2015), 27-35(in Korean)
12. Mokyoung Lee, Recent Trends of the Material Processing Technology with Laser -ICALEO 2014 Review-, *J. of Welding & Joining*, 33(4), (2015), 7-16(in Korean)
13. Yi Zhang, Yeyong Ying, Xixia Liu, Haiying Wei, Deformation control during the laser welding of a Ti6Al4V thin plate using a synchronous gas cooling method., *Materials & Design*, 90 (2016), 931-941
14. Ruifeng Li, Zhuguo Li, Yanyan Zhu, Lei Rong, A comparative study of laser beam welding and laser-MIG hybrid welding of Ti-Al-Zr-Fe titanium alloy, *Materials Science and Engineering A*, 528 (2010), 1138-1142
15. Xiao-Long Gao, Lin-Jie zhang, Jing Liu, Jian-Xun zhang, Porosity and microstructure in pulsed Nd:YAG laser welded Ti6Al4V Sheet, *Journal of Materials Processing Technology*, 214, (2014), 1316-1325